

## University of Groningen

### CO ro-vibrational emission

Hein-Bertelsen, Rosina

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2015

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Hein-Bertelsen, R. (2015). *CO ro-vibrational emission: tracing the geometry of the inner protoplanetary disc*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. [s.n.].

#### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

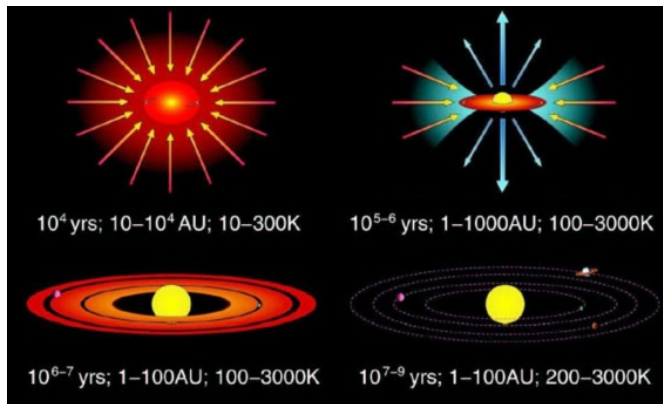
#### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

## Nederlandse Samenvatting

Sterren worden geboren wanneer grote wolken van stof en gas samen trekken onder invloed van hun eigen zwaartekracht (Fig. 6.1), paneel linksboven). In het midden van de ineenstortende wolk onstaat een protoster die wordt omhuld door een grote hoeveelheid invallende materie (Fig. 6.1, paneel rechtsboven). Tijdens het samentrekken zal de wolk gaan roteren, wat leidt tot de vorming van een schijf. Zo'n schijf van stof en gas om een jonge ster heet een protoplanetaire schijf, omdat we denken dat hier de planeten vormen (Fig. 6.1, paneel linksonder). In het huidige beeld van de vorming van sterren komen stofdeeltjes van een micrometer groot samen tot planetesimalen door stolling of instabiliteit. Door botsingen leidt dit tot de vorming van protoplaneten met een diameter van enkele duizenden kilometers.



**Figure 6.1** – Overzicht van de verscheidene stadia van stervorming (Shu et al. 1987).

Als een planeet zich in een protoplanetaire schijf bevindt, verwachten we dat dynamische effecten ervoor zorgen dat de baan geleidelijk wordt leeggeveegd, wat gaten en kloven in de schijf veroorzaakt. Maar er zijn ook andere oorzaken voor de vorming van gaten en kloven, zoals de groei van stofdeeltjes en foto-evaporatie<sup>1</sup>. Foto-evaporatie verwijdert zowel kleine stofdeeltjes als gas, terwijl de groei van stofdeeltjes in principe alleen stof verwijderd (hoewel het gas indirect beïnvloed zou kunnen worden door de veranderingen in het stof). Het is in het geval van planeetvorming nog onduidelijk of gas en stof samen verwijderd worden of dat gas in de kloven en gaten van de schijf blijft zitten. Waarnemingen om de samenstelling en verdeling van gas in stofholtes te bepalen (bijvoorbeeld met nabij-infrarood spectra van de vibratie-rotatie overgangen van koolstofmonoxide)

<sup>1</sup> Foto-evaporatie is een proces waarbij een molecuul of atomaire deeltje door de energie van een foton (een stralingsdeeltje) de ontspanningssnelheid van het systeem bereikt en richting de ruimte "verdamppt".

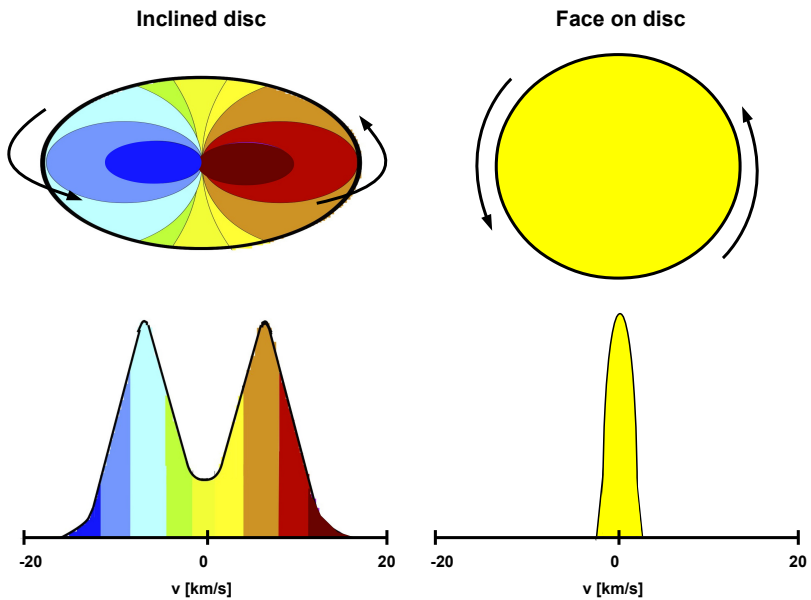
kunnen dus erg leerzaam zijn voor ons begrip over kloven en gaten in de schijf en hun relatie met planeetvorming.

In protoplanetaire schijven hebben de temperatuur en de dichtheid zeer uiteenlopende waarden. Dicht bij de ster, in het binnengebied van de schijf, is het materiaal heet en heeft het een hoge dichtheid ( $>1000\text{ K}$  en  $>10^{14}\text{ cm}^{-2}$ ). Verder weg van de ster, in het buitengebied van de schijf, is het materiaal kouder en heeft het een lagere dichtheid ( $<50\text{ K}$  en  $<10^4\text{ cm}^{-2}$ ). Wanneer straling van de ster moleculen of atomen in de schijf bereikt worden deze aangeslagen naar een hogere energetische toestand. Het molecuul valt vervolgens terug in een lagere toestand waarbij het straling uitzendt wat kan worden waargenomen op golflengtes bepaald door de energie van de overgang. Elke moleculaire overgang heeft een eigen waarschijnlijkheid voor die overgang en een bepaalde energie, die gekoppeld kan worden aan een specifieke plek in de protoplanetaire schijf. Dit betekent dat we door verschillende moleculen te observeren we op andere plekken in de schijf kijken.

In dit proefschrift bestudeer ik de vibratie-rotatieovergangen uitgezonden door het molecuul koolstofmonoxide (CO), het op een na vaakst voorkomende molecuul in het universum. De vibratie-rotatie emissielijnen van CO worden uitgezonden op die plekken in de schijf waar we gaten en tussenruimtes verwachten door planeetvorming. Daarom kunnen deze lijnen helpen om de inhoud en verdeling van het gas in deze gebieden op te helderen.

In de theorie worden emissielijnen in spectra gezien als simpele smalle lijnen op de karakteristieke golflengtes van het uitstralende atoom of molecuul. Als het object beweegt wordt de emissielijn verschoven naar een andere golflengte door de dopplerverschuiving. Bekijken we een roterende schijf onder een hoek, dan beweegt een deel van het stralende materiaal naar ons toe en een ander deel van ons af (zien we de schijf van boven, dan is er geen snelheidscomponent in onze richting vergeleken met de centrale ster). Omdat in de schijf vele verschillende snelheden worden waargenomen zal de emissielijn niet op een enkele golflengte te zien zijn, maar uitgesmeerd worden over een reeks van golflengtes. Met de Dopplervergelijking kunnen dan de snelheden in de schijf worden gevonden. Fig. 6.2 schetst hoe de posities in de schijf zich verhoudt tot de waargenomen snelheden (ter vergelijking is er ook een afbeelding van een schijf gezien van boven). Omdat de rotatiesnelheid van het materiaal in de schijf afhangt van de afstand tot de ster kunnen we de breedte en de vorm van de lijnprofielen gebruiken om de positie af te leiden waar de lijn werd uitgezonden. De gedetailleerde bestudering van de vorm van de emissielijnprofielen van het gas kan dus belangrijke informatie over de geometrie van het uitstralende gas opleveren. Dit kan worden vergeleken met waarnemingen van stof, of direct gebruikt worden om de aan- of afwezigheid van gaten en tussenruimtes af te leiden die mogelijk gerelateerd zijn aan de vorming van planeten.

Ik heb gebruik gemaakt van waarnemingen van protoplanetaire schijven met hoge resolutie en gedetailleerde computermodellen. Hiermee heb ik verkend in welke mate de vorm van de emissielijnen de aanwezigheid van gaten of kloven in de binnengebieden van protoplanetaire schijven kan onthullen. Als we dit goed



**Figure 6.2** – Schets die de relatie tussen posities in een geïnclineerde schijf (links) en de bijbehorende snelheden in de lijnprofielen duidelijk maakt. Zien we echter de schijf van boven dan heeft het materiaal in de schijf geen snelheidscomponent in de richting van de waarnemer (ten opzichte van de ster in het midden), en zal er geen verbreding optreden door de dopplerverschuiving.

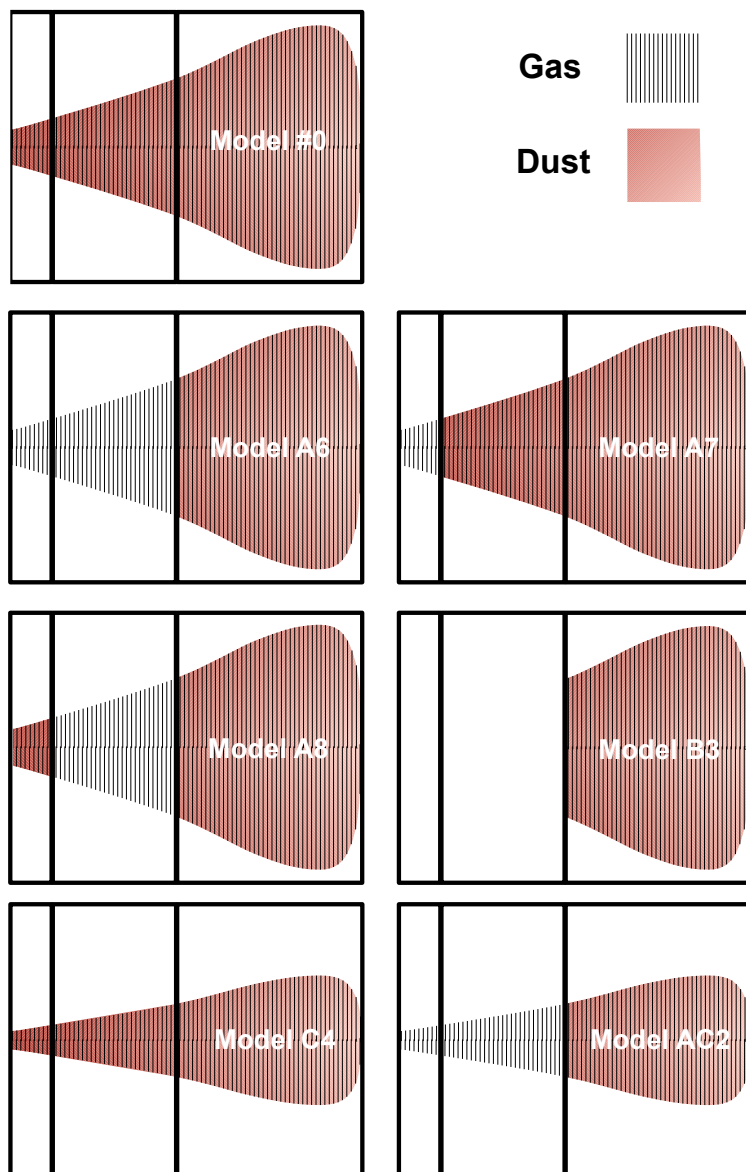
begrijpen hebben we mogelijk weer een puzzelstukje gevonden hoe planeten vormen.

In hoofdstuk 2 heb ik de CO vibratie-rotatie lijnen gemodelleerd van de schijf van HD 100546 (een schijf met een goed bestudeerde geometrie) en vergeleken met waarnemingen. Dit stelde mij in staat om het model van de schijf te testen en de technieken uit dit proefschrift te ontwikkelen. Voor het eerst zijn ook de effecten van intensiteitsverlies bij kloven gevonden en uitgewerkt. Deze effecten zijn nuttig om dichtbijgelegen protoplanetaire schijven te kunnen waarnemen door een nauwe spleet (hetgeen gebruikelijk is bij het observeren van vibratie-rotatie lijnen van CO). Deze puur observationele effecten kunnen vergelijkbare variaties creëren in lijnprofielen als bij fysische verschijnselen zoals schijfwinden, uitstroom en verstoringen in de stroming van het gas door planeten.

In hoofdstuk 3 heb ik vibratie-rotatie lijnen van CO bestudeerd van een verzameling waargenomen proto-planetaire schijven. Ik heb deze waarnemingen gecombineerd met de vibratie-rotatie lijnen van CO van eerder waargenomen protoplanetaire schijven uit andere onderzoeken en geprobeerd daaruit brede conclusies te trekken over de meetbare hoeveelheden van vibratie-rotatie emissie van CO. We hebben twee tegengestelde effecten gevonden: 1) Alle CO vibratie-rotatie van een schijf hebben dezelfde breedte. 2) Lijnen van een schijf worden geleidelijk breder naar mate de lijnen een hogere temperatuur nodig hebben om aangeslagen te worden. Het eerste effect zou gerelateerd kunnen zijn aan de aanwezigheid van een tussenruimte in de schijf die de lijnen beperkt tot een gelijksoortig gebied. Het tweede effect zou kunnen komen door schijven zonder tussenruimtes. In enkele waargenomen schijven geven de vibratie-rotatie lijnen van CO aan dat het gas zich dicht bij de ster bevindt, terwijl waarnemingen van stof aangeven dat er een gat of kloof aanwezig is in deze binnengebieden. Dit suggereert dat gas soms kan achterblijven in een gebied waar stof al is verwijderd.

In hoofdstuk 4 vergelijk ik modellen en waarnemingen van CO vibratie-rotatie lijnen van HD163296, een andere goed bestudeerde schijf met bekende geometrie. Aan deze studie zijn CO vibratie-rotatie lijnen van een ander instrument aan toegevoegd die 10 jaar eerder zijn waargenomen. Deze data onthulde dat de lijnprofielen veranderd zijn met de tijd, en onze analyse toonde een extra emissie component die niet van de roterende schijf komt maar mogelijk afkomstig is van een moleculaire wind. In dit hoofdstuk heb ik ook een veel gebruikte analytische schatting van de gastemperatuur getest: Het passen van de helling uit een Boltzmann diagram. Het blijkt dat deze temperatuurschattingen vaak onbetrouwbaar zijn indien de foutenmarges groot zijn of als de emissie uit een groot gebied komt met verschillende temperaturen.

In hoofdstuk 5 heb ik een tabel van 20 schijfmodellen gemaakt om te kijken wat dit veranderd in de lijnprofielen (Fig. 6.3 toont schetsen van enkele modellen). Deze modellen hebben verschillende geometriën, zoals grote stofgaten (model A7), kleine stofgaten (model A6), stofkloven (model A8), of zonder gaten en tussenruimtes (model #0). Met behulp van deze modellen heb ik enkele algemene ontwikkelingen afgeleid die gebruikt kunnen worden als onafhankelijke



**Figure 6.3** – Schets van de geometrie van gas en stof uit de tabel van modellen. Model #0 - het basismodel, A6 - groot stofgat, A7 - klein stofgat, A8 - stofkloof, B3 - groot gat in stof en gas, C4 - platte schijf, AC2 - platte schijf met groot stofgat.

geometrische aanknopingspunten in toekomstige studies van CO vibratie-rotatie lijnen van protoplanetaire schijven. Deze zijn niet alleen gevonden voor gas, maar ook in zekere mate voor het stof.

We kunnen samenvatten dat waarnemingen van bepaalde CO vibratie-rotatie lijnen essentiële informatie geven over de positie van kloven in het gas en het stof van protoplanetaire schijven. Om de vorm van het binnenste deel van de schijf te bepalen zijn waarnemingen van alleen stof vaak niet voldoende, maar dit kan worden opgelost door analyse van de CO vibratie-rotatie lijnprofielen. De precieze vorm van deze profielen zou in bijna alle gevallen kunnen worden waargenomen met de hoge resolutie van het CRIRES instrument op de Very Large Telescope (bij een hoge signaal/ruis verhouding). CRIRES/VLT is op het moment niet beschikbaar en de tweede keuze op deze golflengte valt daarom op het NIRSPEC instrument van de Keck-telescoop. De enigszins lagere resolutie die dit instrument biedt betekent dat sommige details van de vorm van de lijnprofielen verloren gaan. Voor toekomstige studies van CO vibratie-rotatie lijnprofielen is dus de beschikbaarheid van een instrument met een hoge resolutie als CRIRES cruciaal.